

(11)Publication number : 2002-243416
(43)Date of publication of application : 28.08.2002

(51)Int.Cl. G01B 11/06
H01L 21/66

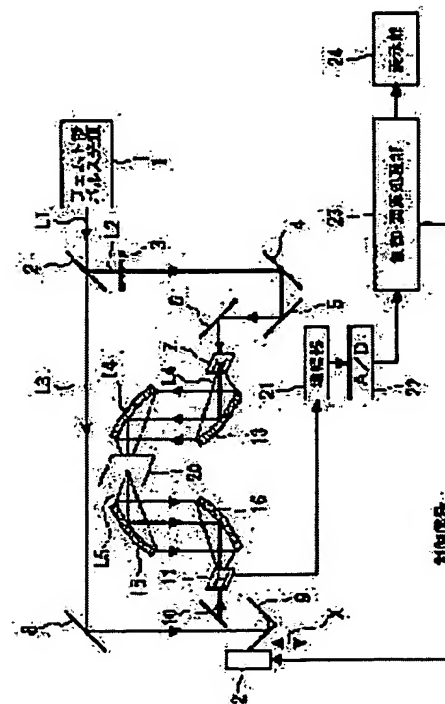
(21)Application number : 2001-036195 (71)Applicant : TOCHIGI NIKON CORP
NIKON CORP
(22)Date of filing : 13.02.2001 (72)Inventor : FUKAZAWA RYOICHI

(54) METHOD AND INSTRUMENT FOR THICKNESS MEASUREMENT AND WAFER

(57)Abstract

PROBLEM TO BE SOLVED: To prevent a body to be measured from being damaged and contaminated and so on by practically measuring the thickness of the object body without contacting.

SOLUTION: The terahertz pulse light emitted by a terahertz light generator 7 irradiates the body 20 to be measured. The terahertz pulse light transmitted through the body 20 to be measured is detected by a terahertz light detector 11. While a movable mirror 10 is shifted, the detector 11 is gated to measure the time-series waveform of the electric field intensity of the transmitted light from the body 20 to be measured. According to the measured time-series waveform, the thickness of the object body 20 is computed.



LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

Copyright (C); 1998,2003 Japan Patent Office

BEST AVAILABLE COPY

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-243416

(P2002-243416A)

(43) 公開日 平成14年8月28日 (2002.8.28)

(51) Int.Cl.⁷

識別記号

F I

テ-コ-ト (参考)

G 0 1 B 11/06

G 0 1 B 11/06

Z 2 F 0 6 5

H 0 1 L 21/66

H 0 1 L 21/66

P 4 M 1 0 6

審査請求 未請求 請求項の数29 O L (全 17 頁)

(21) 出願番号 特願2001-36195(P2001-36195)

(22) 出願日 平成13年2月13日 (2001.2.13)

(71) 出願人 592171153

株式会社栃木ニコン

栃木県大田原市実取770番地

(71) 出願人 000004112

株式会社ニコン

東京都千代田区丸の内3丁目2番3号

(72) 発明者 深澤 亮一

栃木県大田原市実取770番地 株式会社栃
木ニコン内

(74) 代理人 100096770

弁理士 四宮 通

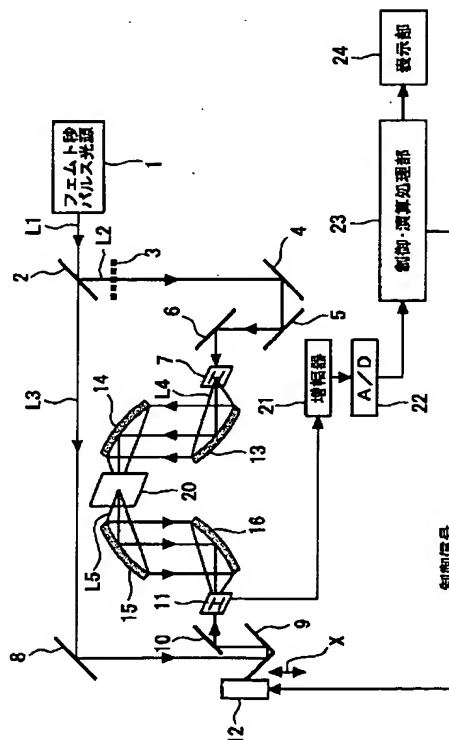
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 厚み測定方法及び装置並びにウエハ

(57) 【要約】

【課題】 非接触で被測定物の厚みを実用的に測定し、被測定物の損傷や汚染等を防止する。

【解決手段】 テラヘルツ光発生器7から発したテラヘルツパルス光は、被測定物20を照射する。被測定物20を透過したテラヘルツパルス光は、テラヘルツ光検出器11で検出される。可動鏡10をずらしながら検出器11にゲートをかけることで、被測定物20の透過光の電場強度の時系列波形が計測される。計測時系列波形に基づいて、被測定物20の厚みが算出される。



【特許請求の範囲】

【請求項 1】 被測定物の厚みを測定する厚み測定方法であって、

テラヘルツパルス光の発生部と該発生部から発生して所定の光路を経て到達するテラヘルツパルス光を検出する検出部とを用いて、前記光路上に前記被測定物を配置した状態で、前記テラヘルツパルス光を前記被測定物に照射することにより前記被測定物を透過して前記検出部により検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である計測時系列波形を取得する段階と、

前記計測時系列波形に基づいて、前記被測定物の厚みを求める段階とを備えたことを特徴とする厚み測定方法。

【請求項 2】 前記厚みを求める前記段階は、前記計測時系列波形において出現する複数のバースト間の時間差に基づいて、前記被測定物の厚みを求める段階を含むことを特徴とする請求項 1 記載の厚み測定方法。

【請求項 3】 前記厚みを求める前記段階は、前記計測時系列波形において 1 番目に出現するバーストと 2 番目に出現するバーストとの間の時間差に基づいて、前記被測定物の厚みを求める段階を含むことを特徴とする請求項 1 記載の厚み測定方法。

【請求項 4】 前記厚みを求める前記段階は、前記光路上に前記被測定物に代えて所定の試料を配置した状態であるいは前記光路上に前記被測定物も前記試料も配置しない状態で、前記発生部から発生されて前記検出部にて検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である基準時系列波形と、前記計測時系列波形との関係に基づいて、前記被測定物の厚みを求める段階を含むことを特徴とする請求項 1 記載の厚み測定方法。

【請求項 5】 前記厚みを求める前記段階は、前記基準時系列波形において出現する所定のバーストと前記計測時系列波形において出現する所定のバーストとの間の時間差に基づいて、前記被測定物の厚みを求める段階を含むことを特徴とする請求項 4 記載の厚み測定方法。

【請求項 6】 前記厚みを求める前記段階は、前記基準時系列波形において 1 番目に出現するバーストと前記計測時系列波形において 1 番目に出現するバーストとの間の時間差に基づいて、前記被測定物の厚みを求める段階を含むことを特徴とする請求項 4 記載の厚み測定方法。

【請求項 7】 前記厚みを求める前記段階は、前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た周波数依存の振幅と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た周波数依存の振幅との比である周波数依存の振幅率を求める段階と、前記周波数依存の振幅率をフーリエ変換して時間領域波形を求める段階と、前記時間領域波形に基づいて前記厚みを求める段階とを含むことを特徴とする請求項 4 記載の厚み測定方法。

【請求項 8】 前記時間領域波形に基づいて前記厚みを求める前記段階は、前記時間領域波形のピークの時間的な位置関係に基づいて前記厚みを求める段階を含むこと

を特徴とする請求項 7 記載の厚み測定方法。

【請求項 9】 前記時間領域波形を求める前記段階の前の段階として、前記周波数依存の振幅率に対して所定の前処理を行う前処理段階を含み、前記時間領域波形を求める前記段階では、前記前処理が行われた前記周波数依存の振幅率をフーリエ変換して前記時間領域波形を求めることを特徴とする請求項 7 又は 8 記載の厚み測定方法。

【請求項 10】 前記前処理段階は、前記周波数依存の振幅率に対して、有効な測光周波数域を越える周波数領域を取り除くフィルタリング処理を行う段階を含むことを特徴とする請求項 9 記載の厚み測定方法。

【請求項 11】 前記前処理段階は、前記周波数依存の振幅率に対して、有効な測光周波数域を越える周波数領域に所定の定数値（0 を含む）を補う段階を含むことを特徴とする請求項 9 又は 10 記載の厚み測定方法。

【請求項 12】 前記厚みを求める前記段階は、前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た周波数依存の位相と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た周波数依存の位相とに基づいて、前記厚みを求める段階を含むことを特徴とする請求項 4 記載の厚み測定方法。

【請求項 13】 前記厚みを求める前記段階は、前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た所定周波数の位相と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た所定周波数の位相との差に基づいて、前記厚みを求める段階を含むことを特徴とする請求項 4 記載の厚み測定方法。

【請求項 14】 前記被測定物がウエハであることを特徴とする請求項 1 乃至 13 のいずれかに記載の厚み測定方法。

【請求項 15】 被測定物の厚みを測定する厚み測定装置であって、

テラヘルツパルス光の発生部と該発生部から発生して所定の光路を経て到達するテラヘルツパルス光を検出する検出部とを含み、前記光路上に前記被測定物を配置した状態で、前記テラヘルツパルス光を前記被測定物に照射することにより前記被測定物を透過して前記検出部により検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である計測時系列波形を取得する計測時系列波形取得部と、前記計測時系列波形に基づいて、前記被測定物の厚みを求める厚み取得部とを備えたことを特徴とする厚み測定装置。

【請求項 16】 前記厚み取得部は、前記計測時系列波形において出現する複数のバースト間の時間差に基づいて、前記被測定物の厚みを求めることを特徴とする請求項 15 記載の厚み測定装置。

【請求項 17】 前記厚み取得部は、前記計測時系列波形において 1 番目に出現するバーストと 2 番目に出現するバーストとの間の時間差に基づいて、前記被測定物の厚みを求めることを特徴とする請求項 15 記載の厚み測定装置。

【請求項 18】 前記厚み取得部は、前記光路上に前記被測定物に代えて所定の試料を配置した状態であるいは前記光路上に前記被測定物も前記試料も配置しない状態で、前記発生部から発生されて前記検出部にて検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である基準時系列波形と、前記計測時系列波形との関係に基づいて、前記被測定物の厚みを求めることを特徴とする請求項 15 記載の厚み測定装置。

【請求項 19】 前記厚み取得部は、前記厚みを求める前記段階は、前記基準時系列波形において出現する所定のバーストと前記計測時系列波形において出現する所定のバーストとの間の時間差に基づいて、前記被測定物の厚みを求めることを特徴とする請求項 18 記載の厚み測定装置。

【請求項 20】 前記厚み取得部は、前記基準時系列波形において 1 番目に出現するバーストと前記計測時系列波形において 1 番目に出現するバーストとの間の時間差に基づいて、前記被測定物の厚みを求めることを特徴とする請求項 18 記載の厚み測定装置。

【請求項 21】 前記厚み取得部は、前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た周波数依存の振幅と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た周波数依存の振幅との比である周波数依存の振幅率を求める振幅率演算部と、前記周波数依存の振幅率をフーリエ変換して時間領域波形を求める時間領域波形演算部と、前記時間領域波形に基づいて前記厚みを求める厚み演算部とを含むことを特徴とする請求項 18 記載の厚み測定装置。

【請求項 22】 前記時間領域波形演算部は、前記時間領域波形のピークの時間的な位置関係に基づいて前記厚みを求めることを特徴とする請求項 21 記載の厚み測定装置。

【請求項 23】 前記厚み取得部は、前記周波数依存の振幅率に対して所定の前処理を行う前処理部を含み、前記時間領域波形演算部は、前記前処理が行われた前記周波数依存の振幅率をフーリエ変換して前記時間領域波形を求めることを特徴とする請求項 21 又は 22 記載の厚み測定装置。

【請求項 24】 前記前処理部は、前記周波数依存の振幅率に対して、有効な測光周波数域を越える周波数領域を取り除くフィルタリング処理を行うことを特徴とする請求項 23 記載の厚み測定装置。

【請求項 25】 前記前処理部は、前記周波数依存の振幅率に対して、有効な測光周波数域を越える周波数領域に所定の定数値 (0 を含む) を補うことを特徴とする請求項 23 又は 24 記載の厚み測定装置。

【請求項 26】 前記厚み取得部は、前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た周波数依存の位相と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た周波数依存の位相とに基づいて、前記厚みを求めることを特徴とする請求項 18 記載の厚み測定装置。

【請求項 27】 前記厚み取得部は、前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た所定周波数の位相と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た所定周波数の位相との差に基づいて、前記厚みを求めることを特徴とする請求項 18 記載の厚み測定装置。

【請求項 28】 前記被測定物がウエハであることを特徴とする請求項 15 乃至 27 のいずれかに記載の厚み測定装置。

【請求項 29】 請求項 1 乃至 14 のいずれかに記載の厚み測定方法により厚みが測定されたことを特徴とするウエハ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、被測定物の厚みを測定する厚み測定方法及び装置、並びにこれにより厚みが測定されたウエハに関するものであり、例えば、半導体ウエハなどの厚みの測定に好適である。

【0002】

【従来の技術】従来の半導体ウエハの厚みの測定方法として、例えば、ウエハの両側を 2 つの接触子で挟むことにより、ウエハにこれらの接触子を接触させ、両接触子間の距離を計測することで、ウエハの厚みを測定していた。

【0003】また、膜厚測定方法として、フーリエ変換赤外分光法 (FTIR 法) が知られている。フーリエ変換赤外分光法は、被測定物に赤外光を照射し、得られた干渉パターンやスペクトル情報から膜厚を測定する方法であり、被測定物に接触子等を接触させる必要はない。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、前記従来の接触による測定方法では、ウエハに接触子を接触させなければならなかったため、ウエハが損傷を受けたり汚染されたりするおそれがあった。この点は、ウエハのみならず他の被測定物についても、同様である。

【0005】また、前記フーリエ変換赤外分光法を半導体ウエハの厚み測定に用いることが考えられる。この場合、赤外光の透過率の周波数に対する振動が利用される。すなわち、赤外光の干渉によって透過率が周波数の関数として振動する。この振動の周期を測定してウエハの厚みを算出する。しかし、産業的に用いられるウエハの厚みを FTIR により測定しようとする場合、使用する分光器に対して高周波数分解が要求され、実際の測定には時間がかかるので、実用的でない。例えば、半導体産業に使用される代表的なウエハの厚みは 700 μm 程度であり、このウエハの厚みをプラスマイナス 10 μm 程度の精度で測定するためには、FTIR の分光器としての分解能は 9×10^{-4} THz 程度でなければならない。FTIR を用いて高分解能で透過率を測定するためには、赤外干渉計の可動鏡を数 10 cm 程度アライメントを保ちながら動かす必要がある。

【0006】しかも、正確な透過率を得るためには可動鏡をSN比が良好になるまで何度も走査する必要がある。したがって、原理的にはFTIRでもウェハの厚みを測定可能であるが、実用的なハード構成の観点からはFTIRを構築するのは困難である。そのために、ウェハの厚み測定装置としてはFTIRは実用化されていない。

【0007】本発明は、このような事情に鑑みてなされたもので、非接触で被測定物の厚みを測定することができ、被測定物の損傷や汚染等を防止することができ、しかも、実用的な厚み測定方法及び装置を提供することを目的とする。

【0008】また、本発明は、厚み測定に伴う損傷や汚染等がなく、高品質なウェハを提供することを目的とする。

【0009】

【課題を解決するための手段】従来の光計測技術においては、光の強度（光の電場の二乗）のみしか検出することができなかったが、近年開発されたいわゆる「テラヘルツ時間領域」の計測技術（例えば、特開平8-320254号）を用いれば、光の電場強度の時系列波形を得ることができる。この新たな計測技術によるテラヘルツ時間領域分光法は、化学分析、半導体ウェハのキャリアの検出、その他の種々の広範囲な用途に利用し得る可能性を秘めていることが、抽象的には指摘されている。

【0010】しかしながら、これまで、半導体ウェハ等の厚み測定においてテラヘルツ時間領域計測技術を利用することについては、その利用の実例やその利用の実際の可能性の指摘などは全くなかった。また、その利用の具体的な手法についても、全く開示も示唆もされていない。

【0011】本発明者は、研究の結果、半導体ウェハ等の厚み測定においてテラヘルツ時間領域計測技術を利用する具体的な手法を創出し、テラヘルツ時間領域計測技術を利用した半導体ウェハ等の厚み測定が有効であることを確認した。本発明は、このような本発明者の研究の結果としてなされたものである。

【0012】すなわち、前記課題を解決するため、本発明の第1の態様による厚み測定方法は、被測定物の厚みを測定する厚み測定方法であって、（a）テラヘルツパルス光の発生部と該発生部から発生して所定の光路を経て到達するテラヘルツパルス光を検出する検出部とを用いて、前記光路上に前記被測定物を配置した状態で、前記テラヘルツパルス光を前記被測定物に照射することにより前記被測定物を透過して前記検出部により検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である計測時系列波形を取得する段階と、（b）前記計測時系列波形に基づいて、前記被測定物の厚みを求める段階とを備えたものである。

【0013】前記被測定物は、ウェハのように、単層か

らなりほぼ平行平板をなす板状部材であってもよいし、例えば、必ずしも平行平板でなくてもよいし、複数層からなるものであってもよい。ウェハとしては、例えば、シリコンウェハや化合物半導体ウェハを挙げることができる。また、前記テラヘルツパルス光は、例えば、概ね 0.1×10^{12} から 100×10^{12} ヘルツまでの周波数領域の光であることが好ましい。これらの点は、後述する各態様についても同様である。

【0014】前記第1の態様によれば、テラヘルツパルス光を被測定物に照射することにより被測定物を透過したパルス光を検出するので、非接触で被測定物の厚みを測定することができ、被測定物の損傷や汚染等を防止することができる。また、前記第1の態様によれば、高周波数分解を持つ分光器が不要となるとともに、フーリエ変換赤外分光法を利用して被測定物の厚みを測定する場合に比べて測定時間を短くすることができ、実用的となる。

【0015】本発明の第2の態様による厚み測定方法は、前記第1の態様において、前記厚みを求める前記段階は、前記計測時系列波形において出現する複数のバースト間の時間差に基づいて、前記被測定物の厚みを求める段階を含むものである。

【0016】今、被測定物が、ウェハのように、単層からなりほぼ平行平板をなす板状部材であるものとする。被測定物の入射側面に入射したテラヘルツパルス光は、その一部は入射面で入射してそのまま透過面（入射面と反対側の面）から出射して被測定物をその厚みの1倍の距離だけ透過して検出部により検出されるが、他の一部は被測定物の内部で被測定物の両側の面で多重反射した後に透過面から出射する。この多重反射した光は、反射回数に応じて被測定物をその厚みの何倍かの距離だけ通過した後に、透過面から出射して検出部により検出される。したがって、計測時系列波形には、被測定物をその厚みの何倍かの距離だけ通過した各光にそれぞれ相当する複数のバーストが順次遅れて出現し、M番目（Mは1以上の整数）に出現するバーストは、被測定物をその厚みの（2M-1）倍の距離だけ通過した光によるものとなる。被測定物の通過距離の少ない光に相当するバースト（すなわち、早く出現するバースト）ほど、減衰が少

ないため、その大きさは大きくなる。

【0017】以上の説明からわかるように、計測時系列波形において各バーストの出現する時間差は、被測定物の厚みの情報を含んでいる。このため、前記第2の態様のように、計測時系列波形において出現する複数のバースト間の時間差に基づいて、被測定物の厚みを求めることができる。

【0018】本発明の第3の態様による厚み測定方法は、前記第1の態様において、前記厚みを求める前記段階は、前記計測時系列波形において1番目に出現するバーストと2番目に出現するバーストとの間の時間差に基

ついて、前記被測定物の厚みを求める段階を含むものである。

【0019】この第3の態様は、前記第2の態様において、用いるバーストを特定したものである。前述したように、計測時系列波形において、早く出現するバーストほど、減衰が少なくその大きさは大きくなる。したがって、前記第3のように、1番目に出現するバーストと2番目に出現するバーストとの間の時間差を用いれば、各バーストのピーク等を精度良く識別することができるので、両者の間の時間差を精度良く得ることができる。このため、前記第3の態様によれば、より精度良く被測定物の厚みを測定することができる。

【0020】本発明の第4の態様による厚み測定方法は、前記第1の態様において、前記厚みを求める前記段階は、前記光路上に前記被測定物に代えて所定の試料を配置した状態であるいは前記光路上に前記被測定物も前記試料も配置しない状態で、前記発生部から発生されて前記検出部にて検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である基準時系列波形と、前記計測時系列波形との関係に基づいて、前記被測定物の厚みを求める段階を含むものである。基準時系列波形は、計測時系列波形の場合と同様にして予め得ておくことができるが、例えば、製品出荷時などに最初に1回だけ得ておいてもよいし、適宜の頻度で得て最新のものをを用いるようにしてもよい。

【0021】計測時系列波形には、被測定物の厚み情報のみならず、発生部や光路や検出部などの光学的特性等も反映されることになる。前記第4の態様のように、予め得た基準時系列波形も用い、計測時系列波形と基準時系列波形との関係に基づいて被測定物の厚みを求めれば、例えば、被測定物の厚みを求めるに際して不要な情報の影響を低減することも可能となる。

【0022】本発明の第5の態様による厚み測定方法は、前記第4の態様において、前記厚みを求める前記段階は、前記基準時系列波形において出現する所定のバーストと前記計測時系列波形において出現する所定のバーストとの間の時間差に基づいて、前記被測定物の厚みを求める段階を含むものである。

【0023】計測時系列波形を得たときと基準時系列波形を得たときとは、被測定物の厚みに依存して、発生部から検出部までの光路長が変化し、検出部へのパルス光の到達時間が変化することになる。したがって、計測時系列波形における各バーストの時間的な位置と基準時系列波形における各バーストの時間的な位置との間の差は、被測定物の厚みの情報を含んでいる。このため、前記第5の態様のように、基準時系列波形において出現する所定のバーストと計測時系列波形において出現する所定のバーストとの間の時間差に基づいて、被測定物の厚みを求めることができる。

【0024】本発明の第6の態様による厚み測定方法

は、前記第4の態様において、前記厚みを求める前記段階は、前記基準時系列波形において1番目に出現するバーストと前記計測時系列波形において1番目に出現するバーストとの間の時間差に基づいて、前記被測定物の厚みを求める段階を含むものである。

【0025】この第6の態様は、前記第5の態様において、用いるバーストを特定したものである。前述したように、計測時系列波形において、早く出現するバーストほど、減衰が少なくその大きさは大きくなる。基準時系列波形においても同様である。したがって、前記第6のように、基準時系列波形の1番目のバーストと計測時系列波形の1番目のバーストとの間の時間差を用いれば、各バーストのピーク等を精度良く識別することができるので、両者の間の時間差を精度良く得ることができる。このため、前記第6の態様によれば、より精度良く被測定物の厚みを測定することができる。

【0026】本発明の第7の態様による厚み測定方法は、前記第4の態様において、前記厚みを求める前記段階は、前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た周波数依存の振幅と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た周波数依存の振幅との比である周波数依存の振幅率を求める段階と、前記周波数依存の振幅率をフーリエ変換して時間領域波形を求める段階と、前記時間領域波形に基づいて前記厚みを求める段階とを含むものである。なお、基準時系列波形として、前記光路上に被測定物も試料も配置しない状態で得たものをを用いれば、前記振幅率は振幅透過率を示すことになる。

【0027】周波数依存の振幅率は、前記比であるので、被測定物の厚さの情報を保持しながら、発生部や光路や検出部などの光学的特性等の影響が低減されている。そして、前記影響が低減された周波数依存の振幅率をフーリエ変換して得た時間領域波形は、テラヘルツパルス光が検出部に到達する時間を再び反映したものとなるため、前記第7の態様のように、時間領域波形に基づいて被測定物の厚みを求めることができる。したがって、前記第7の態様によれば、より精度良く被測定物の厚みを測定することができる。

【0028】本発明の第8の態様による厚み測定方法は、前記第7の態様において、前記時間領域波形に基づいて前記厚みを求める前記段階は、前記時間領域波形のピークの時間的な位置関係に基づいて前記厚みを求める段階を含むものである。この第8の態様は、前記第7の態様における時間領域波形の利用手法の一例を挙げたものである。

【0029】本発明の第9の態様による厚み測定方法は、前記第7又は第8の態様において、前記時間領域波形を求める前記段階の前の段階として、前記周波数依存の振幅率に対して所定の前処理を行う前処理段階を含み、前記時間領域波形を求める前記段階では、前記前処理が行われた前記周波数依存の振幅率をフーリエ変換し

て前記時間領域波形を求めるものである。

【0030】この第9の態様のように前処理段階を行えば、フーリエ変換後の時間領域波形を、テラヘルツパルス光が検出部に到達する時間の情報を適切に反映した波形としながら、所望の波形に調整することが可能となる。

【0031】本発明の第10の態様による厚み測定方法は、前記第9の態様において、前記前処理段階は、前記周波数依存の振幅率に対して、有効な測光周波数域を越える周波数領域を取り除くフィルタリング処理を行う段階を含むものである。

【0032】この第10の態様のように、前処理としてフィルタリング処理を行えば、ノイズが除去された時間領域波形を得ることができ、ひいては、より精度良く被測定物の厚みを測定することができる。有効な測光周波数域を越える周波数領域は、例えば、テラヘルツパルス光の多重反射によって生ずる干渉縞が現れる周波数領域である。この点は、後述する各態様についても同様である。

【0033】本発明の第11の態様による厚み測定方法は、前記第9の態様において、前記前処理段階は、前記周波数依存の振幅率に対して、有効な測光周波数域を越える周波数領域に所定の定数値（0を含む）を補う段階を含むものである。

【0034】有効な測光周波数域が限られていることから、周波数依存の振幅率をそのままフーリエ変換して時間領域波形を得ると、時間領域波形において、テラヘルツパルス光の到達を示すピークの他に疑似ピークも現れる。前記第9の態様のように、有効な測光周波数域を越える周波数領域に所定の定数値（0を含む）を補い、これをフーリエ変換すれば、疑似ピーク等を低減した時間領域波形を得ることが可能である。したがって、前記第11の態様によれば、テラヘルツパルス光が検出部に到達する時間情報を精度良く得ることができ、ひいては、より精度良く被測定物の厚みを測定することができる。

【0035】本発明の第12の態様による厚み測定方法は、前記第4の態様において、前記厚みを求める前記段階は、前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た周波数依存の位相と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た周波数依存の位相とに基づいて、前記厚みを求める段階を含むものである。

【0036】後に詳述するように、本発明者の研究の結果、前記第12の態様のように、計測時系列波形をフーリエ変換して得た周波数依存の位相と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た周波数依存の位相とに基づいて、被測定物の厚みを求めることができることが、判明した。

【0037】本発明の第13の態様による厚み測定方法は、前記第4の態様において、前記厚みを求める前記段階は、前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た所定

周波数の位相と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た所定周波数の位相との差に基づいて、前記厚みを求める段階を含むものである。

【0038】この第13の態様による厚み測定方法は前記第12の態様の具体例であるが、前記第12の態様では、この例に限定されるものではない。

【0039】本発明の第14の態様による厚み測定方法は、前記第1乃至第13のいずれかの態様において、前記被測定物がウエハであるものである。

【0040】前記第1乃至第13の態様では、前述したように被測定物はウエハに限定されるものではないが、非接触で測定することができて損傷や汚染を防止することができるため、ウエハの厚み測定に好適である。

【0041】本発明の第15の態様による厚み測定装置は、被測定物の厚みを測定する厚み測定装置であって、

（a）テラヘルツパルス光の発生部と該発生部から発生して所定の光路を経て到達するテラヘルツパルス光を検出する検出部とを含み、前記光路上に前記被測定物を配置した状態で、前記テラヘルツパルス光を前記被測定物に照射することにより前記被測定物を透過して前記検出部により検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である計測時系列波形を取得する計測時系列波形取得部と、（b）前記計測時系列波形に基づいて、前記被測定物の厚みを求める厚み取得部とを備えたものである。

【0042】本発明の第16の態様による厚み測定装置は、前記第15の態様において、前記厚み取得部は、前記計測時系列波形において出現する複数のバースト間の時間差に基づいて、前記被測定物の厚みを求めるものである。

【0043】本発明の第17の態様による厚み測定装置は、前記第15の態様において、前記厚み取得部は、前記計測時系列波形において1番目に出現するバーストと2番目に出現するバーストとの間の時間差に基づいて、前記被測定物の厚みを求めるものである。

【0044】本発明の第18の態様による厚み測定装置は、前記第15の態様において、前記厚み取得部は、前記光路上に前記被測定物に代えて所定の試料を配置した状態であるいは前記光路上に前記被測定物も前記試料も配置しない状態で、前記発生部から発生されて前記検出部にて検出されるパルス光の、電場強度の時系列波形である基準時系列波形と、前記計測時系列波形との関係に基づいて、前記被測定物の厚みを求めるものである。

【0045】本発明の第19の態様による厚み測定装置は、前記第18の態様において、前記厚み取得部は、前記厚みを求める前記段階は、前記基準時系列波形において出現する所定のバーストと前記計測時系列波形において出現する所定のバーストとの間の時間差に基づいて、前記被測定物の厚みを求めるものである。

【0046】本発明の第20の態様による厚み測定装置は、前記第18の態様において、前記厚み取得部は、前

記基準時系列波形において1番目に出現するバーストと前記計測時系列波形において1番目に出現するバーストとの間の時間差に基づいて、前記被測定物の厚みを求めるものである。

【0047】本発明の第21の態様による厚み測定装置は、前記第18の態様において、前記厚み取得部は、前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た周波数依存の振幅と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た周波数依存の振幅との比である周波数依存の振幅率を求める振幅率演算部と、前記周波数依存の振幅率をフーリエ変換して時間領域波形を求める時間領域波形演算部と、前記時間領域波形に基づいて前記厚みを求める厚み演算部とを含むものである。

【0048】本発明の第22の態様による厚み測定装置は、前記第21の態様において、前記時間領域波形演算部は、前記時間領域波形のピークの時間的な位置関係に基づいて前記厚みを求めるものである。

【0049】本発明の第23の態様による厚み測定装置は、前記第21又は第22の態様において、前記厚み取得部は、前記周波数依存の振幅率に対して所定の前処理を行う前処理部を含み、前記時間領域波形演算部は、前記前処理が行われた前記周波数依存の振幅率をフーリエ変換して前記時間領域波形を求めるものである。

【0050】本発明の第24の態様による厚み測定装置は、前記第23の態様において、前記前処理部は、前記周波数依存の振幅率に対して、有効な測光周波数域を越える周波数領域を取り除くフィルタリング処理を行うものである。

【0051】本発明の第25の態様による厚み測定装置は、前記第23の態様において、前記前処理部は、前記周波数依存の振幅率に対して、有効な測光周波数域を越える周波数領域に所定の定数値(0を含む)を補うものである。

【0052】本発明の第28の態様による厚み測定装置は、前記第18の態様において、前記厚み取得部は、前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た周波数依存の位相と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た周波数依存の位相とに基づいて、前記厚みを求めるものである。

【0053】本発明の第27の態様による厚み測定装置は、前記第18の態様において、前記厚み取得部は、前記計測時系列波形をフーリエ変換して得た所定周波数の位相と前記基準時系列波形をフーリエ変換して得た所定周波数の位相との差に基づいて、前記厚みを求めるものである。

【0054】本発明の第28の態様による厚み測定装置は、前記第15乃至第27のいずれかの態様において、前記被測定物がウェハであるものである。

【0055】前記第15乃至第28の態様によれば、前記第1乃至第14の態様による厚み測定方法をそれぞれ

実現することができる。

【0056】本発明の第29の態様によるウェハは、前記第1乃至第14のいずれかの態様態様による厚み測定方法により厚みが測定されたものである。

【0057】ウェハは、一般的に、検査等のためにその厚みが測定される。この第29の態様によるウェハは、非接触で厚みが測定されたものであるため、損傷や汚染がなく高品質なものとなる。

【0058】

10 【発明の実施の形態】以下、本発明による厚み測定方法及び装置、並びにこれにより厚みが測定されたウェハについて、図面を参照して説明する。

【0059】[第1の実施の形態]

【0060】図1は、本発明の第1の実施の形態による厚み測定装置を模式的に示す概略構成図である。図2は、本実施の形態による厚み測定装置の制御・演算処理部23の動作を示す概略フローチャートである。

20 【0061】本実施の形態による厚み測定装置では、図1に示すように、レーザ光源等からなるフェムト秒パルス光源から放射されたフェムト秒パルス光L1が、ビームスプリッタ2で2つのパルス光L2、L3に分割される。

【0062】一方のパルス光L2は、テラヘルツ光発生器7を励起して発生器7にテラヘルツパルス光を発生させるためのポンプパルス(パルス励起光)となる。このポンプパルスL2は、チョッパ3によりチョッピングされた後に、平面反射鏡4、5、6を経て、テラヘルツ光発生器7へ導かれる。他方のパルス光L3は、テラヘルツパルス光を検出するタイミングを定めるブローパルス(サンプリングパルス光)となる。このブローパルスL3は、平面反射鏡8、2枚の平面反射鏡が組み合わされてなる可動鏡9、及び平面反射鏡10を経て、テラヘルツ光検出器11へ導かれる。

【0063】ブローパルスL3の光路上に配置された可動鏡9は、制御・演算処理部23による制御下で、移動機構12により矢印X方向に移動可能となっている。可動鏡9の移動量に応じて、ブローパルスL3の光路長が変わり、ブローパルスL3が検出器11へ到達する時間が遅延する。すなわち、本実施の形態では、可動鏡9及び移動機構12が、ブローパルスL3の時間遅延装置を構成している。

【0064】発生器7に導かれたポンプパルスL2により、発生器7が励起されてテラヘルツパルス光L4を放射する。テラヘルツパルス光L4としては、概ね0.1×10¹²から100×10¹²ヘルツまでの周波数領域の光が望ましい。このテラヘルツパルス光L4は、曲面鏡13、14を経て集光位置に集光される。本実施の形態では、この集光位置には、被測定物20の測定部位が配置される。本実施の形態では、被測定物20は、ウェハなどの、単層からなりほぼ平行平板をなす板状部材

とされている。もっとも、被測定物20はこれに限定されるものではない。被測定物20は、テラヘルツパルス光L4の被測定物20に対する光軸が被測定物20の面の法線とほぼ一致するように、配置されている。測定精度を高めるべく、被測定物20に入射するテラヘルツパルス光L4の最も外側の光線と光軸とのなす角が、比較的小さくなるように設定されている。図面には示していないが、テラヘルツパルス光L4が被測定物20に対して平行光として入射するような照射光学系を採用すると、測定精度を向上させる上でより好ましい。

【0065】被測定物20を透過したテラヘルツパルス光L5は、曲面鏡15、16を経て、検出器11により検出されて電気信号に変換される。

【0066】フェムト秒パルス光源1から放射されるフェムト秒パルス光L1の繰り返し周期は、数kHzからMHzオーダーである。したがって、発生器7から放射されるテラヘルツパルス光L4も、数kHzからMHzオーダーの繰り返しで放射される。現在の検出器11では、このテラヘルツパルス光の波形を瞬時に、その形状のまま計測することは不可能である。

【0067】したがって、本実施の形態では、同じ波形のテラヘルツパルス光L4が数kHzからMHzオーダーの繰り返しで到来することを利用して、ポンプパルスL2とプローブパルスL3との間に時間遅延を設けてテラヘルツパルス光L5の波形を計測する、いわゆるポンプ・プローブ法を採用している。すなわち、テラヘルツ光発生器7を作動させるポンプパルスL2に対して、テラヘルツ光検出器11を作動させるタイミングを τ 秒だけ遅らせることにより、 τ 秒だけ遅れた時点でのテラヘルツパルス光L5の電場強度を検出器11で測定できる。言い換えれば、プローブパルスL3は、テラヘルツ光検出器11に対してゲートをかけていることになる。また、可動鏡9を徐々に移動させることは、遅延時間 τ を徐々に変えることにほかならない。前記時間遅延装置によってゲートをかけるタイミングをずらしながら、繰り返し到来するテラヘルツパルス光L5の各遅延時間 τ ごとの時点の電場強度を検出器11から電気信号として順次得ることによって、テラヘルツパルス光L5の電場強度の時系列波形 $E(t)$ を計測することができる。

【0068】なお、テラヘルツ光検出器11は、プローブパルスL3を受けた時のみ光励起キャリアを生ずるようになっており、同時にテラヘルツパルス光の電場がかかっていれば、その電場に比例した光伝導電流が流れる。このとき測定される電流 $J(\tau)$ は、テラヘルツパルス光の電場 $E(t)$ と光励起キャリアの光伝導度 $g(t-\tau)$ のコンボリューションで表せ、 $J(t) = \int E(t) g(t-\tau) d\tau$ のような形で書ける。光伝導度 $g(t-\tau)$ がデルタ関数であるので、測定された電流値は到来するテラヘルツパルス光L5の電場強度 $E(t)$ に比例したものになる。検出器11からの電気信

号は、増幅器21で増幅された後に、A/D変換器22によりA/D変換される。

【0069】本実施の形態では、テラヘルツパルス光L5の電場強度の時系列波形 $E(t)$ の計測時には、制御・演算処理部23が、移動機構12に制御信号を与えて、前記遅延時間 τ を徐々に変化させながら、A/D変換器22からのデータを制御・演算処理部23内の図示しないメモリに順次格納する。これによって、最終的に、テラヘルツパルス光L5の電場強度の時系列波形 $E(t)$ を示すデータ全体をメモリに格納する。

【0070】ここでは、発生器7と検出器11との間の光路（本実施の形態では、図1に示すテラヘルツパルス光L4の集光位置）に被測定物20が配置された状態で、前述したようにして計測される、テラヘルツパルス光の電場強度の時系列波形 $E(t)$ を、計測時系列波形 $E_{\dots}(t)$ と呼ぶ。

【0071】以上の説明からわかるように、本実施の形態では、前述した要素1~16、21、22、並びに、制御・演算処理部23の前述した移動機構12の制御機能及びA/D変換器22からのデータ取り込み機能が、計測時系列波形 $E_{\dots}(t)$ を取得する計測時系列波形取得部を構成している。制御・演算処理部23は、後述する図2に示す動作を行うが、例えば、コンピュータを用いて構成することができる。

【0072】ここで、本実施の形態で採用されている、計測時系列波形 $E_{\dots}(t)$ に基づいて被測定物20の厚み d を求める手法について、説明する。

【0073】図3は、本実施の形態において実際に得られた計測時系列波形 $E_{\dots}(t)$ の一例を示す波形図である。図3に示す計測時系列波形 $E_{\dots}(t)$ にはバースト[1]、[2]が出現しており、1番目に出現するバースト[1]と2番目に出現するバースト[2]のみを図示している。

【0074】これらのバースト[1]、[2]の物理的な意義について、図4を参照して説明する。図4(a)~(b)は被測定物20の測定部位付近の様子を模式的に示す図である。図4(a)は被測定物20に入射するテラヘルツパルス光のうち被測定物20の内部で反射せずに透過する光を示し、図4(b)は被測定物20の内部で2回反射した後に透過する光を示し、図4(c)は被測定物20の内部で4回反射した後に透過する光を示し、図4(d)は被測定物20の内部で $(2M-2)$ 回反射した後に透過する光を示している。ただし、 M は1以上の整数である。図4からわかるように、図4(a)~(d)に示す各光は、被測定物20をその厚み d のそれぞれ1倍、3倍、5倍、 $(2M-1)$ 倍の距離だけ通過した後に透過して、テラヘルツ光検出器11により検出され、計測時系列波形 $E_{\dots}(t)$ において、それぞれ1番目のバースト[1]、2番目のバースト[2]、3番目のバースト[3]、 M 番目のバースト[M]とし

て出現する。各バーストが順次遅れて出現するのは、対応する光の被測定物20内での通過距離が相違することによる。また、被測定物20内での通過距離の少ない光に相当するバースト（すなわち、早く出現するバースト）ほど、減衰が少ないため、その大きさは大きい。

【0075】複数のバースト間の通過距離の差は厚みdの倍数であるため、計測時系列波形 $E_{...}(t)$ における複数のバースト間の時間差は、被測定物20の厚みdの情報を含んでいる。このため、複数のバースト間の時間差から厚みdを算出することができる。

【0076】例えば、図3に示すように、1番目のバースト[1]と2番目のバースト[2]との間の時間差 Δt_1 から、下記数1によって被測定物20の厚みdを算出することができる。数1において、nは被測定物20の屈折率、cは光速を示す。

【0077】

【数1】

$$d = \frac{c \Delta t_1}{2n}$$

【0078】複数のバースト間の時間差を求めるに際して、図3に示すように、各バーストにおける最も大きいピークを各バーストの出現時点とし、これらの出現時点の差として求めることが、好ましい。このとき、いずれの2つのバースト間の時間差を用いても、被測定物20の厚みdを算出することができる。例えば、1番目のバースト[1]と3番目のバースト[3]との間の時間差を用いても厚みdを算出することができる。しかしながら、早く出現するバーストほどその大きさが大きくなってピークも大きくなり、ピークを精度良く識別することができる。このため、時間差を求める精度、ひいては、厚みdの測定精度を高める上で、1番目のバースト

[1]と2番目のバースト[2]との間の時間差 Δt_1 から、厚みdを算出することが、好ましい。

【0079】次に、制御・演算処理部23の動作の一例について、図2を参照して説明する。制御・演算処理部23は、動作を開始すると、まず、既に説明した計測動作によって、計測時系列波形 $E_{...}(t)$ を計測する（ステップS1）。次いで、制御・演算処理部23は、ステップS1で得た計測時系列波形 $E_{...}(t)$ から図3中の時間差 Δt_1 を求める（ステップS2）。その後、制御・演算処理部23は、ステップS2で得た時間差 Δt_1 から前記数1に従って被測定物20の厚みdを算出し（ステップS3）、算出した厚みdをCRT等の表示部24に表示させ（ステップS4）、動作を終了する。

【0080】本実施の形態によれば、テラヘルツパルス光を被測定物20に照射することにより被測定物20を透過したパルス光を検出するので、非接触で被測定物20の厚みdを測定することができ、被測定物20の損傷

や汚染等を防止することができる。したがって、被測定物20をウエハとした場合には、厚み測定に伴う損傷や汚染等がなく、高品質なウエハを提供することができる。

【0081】[第2の実施の形態]

【0082】図5は、第2の実施の形態による厚み測定装置の制御・演算処理部23の動作を示す概略フローチャートである。

【0083】本実施の形態による厚み測定装置が前記第1の実施の形態と異なる所は、制御・演算処理部23の動作のみであり、重複する説明は省略する。

【0084】まず、本実施の形態で採用されている、計測時系列波形 $E_{...}(t)$ に基づいて被測定物20の厚みdを求める手法について、説明する。

【0085】本実施の形態では、発生器7と検出器11との間の光路上に被測定物20を配置しない状態で、計測時系列波形 $E_{...}(t)$ の場合と同様に、テラヘルツパルス光の電場強度の時系列波形 $E(t)$ を、予め計測しておく。この時系列波形 $E(t)$ を基準時系列波形 $E_{ref}(t)$ と呼ぶ。

【0086】図6は、本実施の形態において実際に得られた計測時系列波形 $E_{...}(t)$ 及び基準時系列波形 $E_{ref}(t)$ の一例を示す波形図である。図6中の計測時系列波形 $E_{...}(t)$ は、図3中の計測時系列波形 $E_{...}(t)$ と同一である。図6において、[1]'は、基準時系列波形 $E_{ref}(t)$ において1番目に出現したバーストを示す。本実施の形態では、基準時系列波形 $E_{ref}(t)$ は前記光路上に被測定物20も他の試料も配置しないで計測されたものであるため、基準時系列波形 $E_{ref}(t)$ には2番目以降のバーストは存在しない。

【0087】計測時系列波形 $E_{...}(t)$ を得たときと基準時系列波形 $E_{ref}(t)$ を得たときとは、被測定物20の厚みdに依存して、発生器7から検出器11までの光路長が変化し、検出器11へのパルス光の到達時間が変化することになる。したがって、基準時系列波形 $E_{ref}(t)$ における1番目のバースト[1]'と、このバースト[1]'に対応する計測時系列波形 $E_{...}(t)$ におけるバースト[1]との間の時間差 Δt_2 （図6参照）は、被測定物20の厚みdの情報を含んでいる。このため、時間差 Δt_2 から厚みdを算出することができ、具体的には、次の数2に従って算出することができる。数2において、nは被測定物20の屈折率、cは光速を示す。

【0088】

【数2】

$$d = \frac{c}{(n-1)} \Delta t_2$$

【0089】ところで、前記光路上に被測定物20も他の試料も配置しないで時系列波形 $E(t)$ を計測するということは、被測定物20の厚みdと同じ厚みで屈折率

が1の試料を前記光路上に配置したのと等価である。したがって、被測定物20の代わりに、既知の屈折率 n' 及び既知の厚み d' を持つ試料(例えば、単層からなりほぼ平行平板をなす板状部材)を、前記光路上に配置した状態において、計測した時系列波形 $E(t)$ を、基準時系列波形 $E_{ref}(t)$ として用いてもよいことがわかる。この場合、基準時系列波形 $E_{ref}(t)$ における1番目のバースト[1]"と、このバースト[1]"に対応する計測時系列波形 $E_{sam}(t)$ におけるバースト[1]"との間の時間差 $\Delta t_2'$ から、次の数3に従って被測定物20の厚み d を算出することができる。

【0090】

【数3】

$$d = \frac{c \Delta t_2' + n' d'}{n}$$

【0091】前記光路上に前記試料を配置した場合の基準時系列波形 $E_{ref}(t)$ を用いる場合には、多重反射により2番目以降のバーストが出現する。このため、例えば、基準時系列波形 $E_{ref}(t)$ における2番目のバースト[2]"と、このバースト[2]"に対応する計測時系列波形 $E_{sam}(t)$ におけるバースト[2]"との間の時間差から、被測定物20の厚み d を算出することもできる。

【0092】次に、本実施の形態における制御・演算処理部23の動作の一例について、図5を参照して説明する。制御・演算処理部23は、動作を開始すると、まず、計測時系列波形 $E_{sam}(t)$ の計測時と同様の計測動作によって、基準時系列波形 $E_{ref}(t)$ を計測する(ステップS11)。次いで、制御・演算処理部23は、計測時系列波形 $E_{sam}(t)$ を計測し(ステップS12)、ステップS11、S12でそれぞれ得た時系列波形 $E_{sam}(t)$ 、 $E_{ref}(t)$ から図6中の時間差 Δt_2 を求める(ステップS13)。その後、制御・演算処理部23は、ステップS13で得た時間差 Δt_2 から前記数2に従って被測定物20の厚み d を算出し(ステップS14)、算出した厚み d を表示部24に表示させ(ステップS15)、動作を終了する。

【0093】なお、ステップS11は被測定物20の厚み測定を行う必要はなく、適宜の頻度で行ってもよい。

$$\begin{aligned} t(\omega) &= \frac{E_{sam}(\omega)}{E_{ref}(\omega)} = \frac{|E_{sam}(\omega)|}{|E_{ref}(\omega)|} \exp[i\{\theta_{sam}(\omega) - \theta_{ref}(\omega)\}] \\ &\equiv T(\omega) e^{i\phi(\omega)} \end{aligned}$$

【0104】そして、本実施の形態では、振幅透過率 $T(\omega)$ について、次の数6で定義されるようなフーリエ変換を実行して、時間領域波形 $S(t)$ を求める。

【0105】

【数6】

*いし、例えば、製品出荷時などに最初に1回行うのみでもよい。

【0094】本実施の形態によっても、前記第1の実施の形態と同様の利点が得られる。

【0095】[第3の実施の形態]

【0096】図7は、第3の実施の形態による厚み測定装置の制御・演算処理部23の動作を示す概略フローチャートである。

【0097】本実施の形態による厚み測定装置が前記第1の実施の形態と異なる所は、制御・演算処理部23の動作のみであり、重複する説明は省略する。

【0098】まず、本実施の形態で採用されている、計測時系列波形 $E_{sam}(t)$ に基づいて被測定物20の厚み d を求める手法について、説明する。

【0099】本実施の形態では、前記第2の実施の形態と同様に、発生器7と検出器11との間の光路上に被測定物20を配置しない状態で、基準時系列波形 $E_{ref}(t)$ を予め計測しておく。

【0100】基準時系列波形 $E_{ref}(t)$ について、次の数4で定義されるようなフーリエ変換を実行して、参照用(基準用)の振幅 $|E_{ref}(\omega)|$ と位相 $\theta_{ref}(\omega)$ を得る。また、計測時系列波形 $E_{sam}(t)$ について、次の数4で定義されるようなフーリエ変換を実行して、振幅 $|E_{sam}(\omega)|$ と位相 $\theta_{sam}(\omega)$ を得る。本実施の形態では、位相 $\theta_{ref}(\omega)$ 及び位相 $\theta_{sam}(\omega)$ は、必ずしも得る必要はない。

【0101】

【数4】

$$E(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} E(t) \exp(i\omega t) dt = |E(\omega)| \exp[i\theta(\omega)]$$

【0102】さらに、次の数5に従って、被測定物20の複素振幅透過率 $t(\omega)$ を求める。すなわち、振幅 $|E_{sam}(\omega)|$ と振幅 $|E_{ref}(\omega)|$ と比である振幅透過率 $T(\omega)$ を得るとともに、位相 $\theta_{sam}(\omega)$ と位相 $\theta_{ref}(\omega)$ の差である位相差 $\phi(\omega)$ を得る。本実施の形態では、位相差 $\phi(\omega)$ は必ずしも得る必要はない。

【0103】

【数5】

$$S(t) = \int_{-\infty}^{\infty} T(\omega) \exp(-i\omega t) d\omega$$

【0106】図8(a)(b)は、計測時系列波形 $E_{sam}(t)$ 及び基準時系列波形 $E_{ref}(t)$ が図6に示す通りである場合に得られた、振幅透過率 $T(\omega)$ 及び前

記フーリエ変換により得た時間領域波形 $S(t)$ を、それぞれ示している。

【0107】振幅透過率 $T(\omega)$ は、振幅 $|E_{\text{ref}}(\omega)|$ と振幅 $|E_{\text{ref}}(\omega)|$ と比であるので、被測定物 20 の厚み d の情報を保持しながら、発生器 7 や検出器 11 やその間の光路の光学的特性等の影響が低減されている。そして、時間領域波形 $S(t)$ は、振幅透過率 $T(\omega)$ をフーリエ変換したものであるため、テラヘルツパルス光が検出器 11 に到達する時間を再び反映したものとなる。図 8 (b) 中のピーク L_1 に現れた時間 Δt_{L_1} を用いて、次の数 7 から被測定物 20 の厚み d を算出することができる。

【0108】

【数 7】

$$d = \frac{c \Delta t_{L_1}}{2n}$$

【0109】次に、本実施の形態における制御・演算処理部 23 の動作の一例について、図 7 を参照して説明する。制御・演算処理部 23 は、動作を開始すると、基準時系列波形 $E_{\text{ref}}(t)$ を計測し (ステップ S21)、基準時系列波形 $E_{\text{ref}}(t)$ をフーリエ変換して振幅 $|E_{\text{ref}}(\omega)|$ を求める (ステップ S22)。次いで、制御・演算処理部 23 は、計測時系列波形 $E_{\text{meas}}(t)$ を計測し (ステップ S23)、計測時系列波形 $E_{\text{meas}}(t)$ をフーリエ変換して振幅 $|E_{\text{meas}}(\omega)|$ を求め (ステップ S24)、振幅透過率 $T(\omega)$ を算出する (ステップ S25)。その後、制御・演算処理部 23 は、振幅透過率 $T(\omega)$ をフーリエ変換して時間領域波形 $S(t)$ を求め (ステップ S26)、時間領域波形 $S(t)$ から図 8 (b) 中の時間差 Δt_{L_1} を求め (ステップ S27)、前記数 7 に従って被測定物 20 の厚み d を算出し (ステップ S28)、算出した厚み d を表示部 24 に表示させ (ステップ S29)、動作を終了する。

【0110】なお、ステップ S21、S22 は被測定物 20 の厚み測定の度に行う必要はなく、適宜の頻度で行ってもよいし、例えば、製品出荷時などに最初に 1 回行うのみでもよい。

【0111】本実施の形態によっても、前記第 1 の実施の形態と同様の利点が得られる。

【0112】〔第 4 の実施の形態〕

【0113】図 9 は、第 4 の実施の形態による厚み測定装置の制御・演算処理部 23 の動作を示す概略フローチャートである。図 9 において、図 7 中のステップと同一又は対応するステップには同一符号を付し、その重複する説明は省略する。

【0114】本実施の形態による厚み測定装置が前記第 3 の実施の形態と異なる所は、制御・演算処理部 23 の動作の一部のみであり、重複する説明は省略する。

【0115】本実施の形態では、図 9 に示すように、時間領域波形 $S(t)$ を求めるステップ S26 の前処理段

階として、ステップ S25、S26 間においてステップ S30 が行われる。ステップ S30 において、制御・演算処理部 23 は、振幅透過率 $T(\omega)$ に対して、有効な測光周波数域を越える周波数領域 (例えば、テラヘルツパルス光の多重反射によって生ずる干渉縞が現れる周波数領域) を取り除くフィルタリング処理を行う。ステップ S26 では、制御・演算処理部 23 は、このフィルタリング処理された振幅透過率 $T(\omega)$ をフーリエ変換して時間領域波形 $S(t)$ を求める。

【0116】本実施の形態によれば、ステップ S26 の前処理としてフィルタリング処理を行うので、ノイズが除去された時間領域波形 $S(t)$ を得ることができ、ひいては、より精度良く被測定物 20 の厚み d を測定することができる。

【0117】〔第 5 の実施の形態〕

【0118】図 10 は、第 5 の実施の形態による厚み測定装置の制御・演算処理部 23 の動作を示す概略フローチャートである。図 10 において、図 7 中のステップと同一又は対応するステップには同一符号を付し、その重複する説明は省略する。

【0119】本実施の形態による厚み測定装置が前記第 3 の実施の形態と異なる所は、制御・演算処理部 23 の動作の一部のみであり、重複する説明は省略する。

【0120】本実施の形態では、図 9 に示すように、時間領域波形 $S(t)$ を求めるステップ S26 の前処理段階として、ステップ S25、S26 間においてステップ S31 が行われる。ステップ S31 において、制御・演算処理部 23 は、振幅透過率 $T(\omega)$ に対して、有効な測光周波数域を越える周波数領域に所定の定数値 (0 を含む) を補う処理を行う。

【0121】有効な測光周波数域が限られていることから、振幅透過率 $T(\omega)$ をそのままフーリエ変換して時間領域波形 $S(t)$ を得ると、時間領域波形 $S(t)$ において、テラヘルツパルス光の到達を示すピークの他に疑似ピークも現れる。これに対し、本実施の形態では、有効な測光周波数域を越える周波数領域に所定の定数値 (0 を含む) を補い、これをフーリエ変換するので、疑似ピーク等を低減した時間領域波形が得ることが可能である。したがって、本実施の形態によれば、テラヘルツパルス光が検出器 11 に到達する時間情報を精度良く得ることができ、ひいては、より精度良く被測定物の厚みを測定することができる。なお、前記定数値の符号は正でも負でもよい。

【0122】ここで、前記第 4 及び第 5 の実施の形態における時間領域波形 $S(t)$ を求めるステップ S26 の前処理段階の効果、すなわち、図 9 中のステップ S30 及び図 10 中のステップ S31 の効果について、図 12 を参照して説明する。

【0123】図 12 (a) は、実際に得られた振幅透過率 $T(\omega)$ に対して、有効な測光周波数域 (本例では、

0~1 THz) を越える周波数領域を取り除くフィルタリング処理(図9中のステップS30に相当)を行って得た振幅透過率を示す。図12(b)は、図12(a)に示す振幅透過率をフーリエ変換して得た時間領域波形S(t)を示す。図12(b)に示す時間領域波形S(t)では、実際に得られた振幅透過率T(ω)を直接フーリエ変換して得た時間領域波形S(t)(図示せず)に比べてノイズが除去されているものの、テラヘルツパルス光の到達を示すピークの他に疑似ピークも比較顕著に現れている。

【0124】図12(c)は、実際に得られた振幅透過率T(ω)(図12(a)の場合と同じ)に対して、有効な測光周波数域(本例では、0~1 THz)を越える周波数領域に所定の定数値(本例では、前記有効な測光周波数域の平均値)を補う処理(図10中のステップS31に相当)を行って得た振幅透過率を示す。図12(d)は、図12(c)に示す振幅透過率をフーリエ変換して得た時間領域波形S(t)を示す。図12(d)に示す時間領域波形S(t)では、図12(b)に示す時間領域波形S(t)に比べて、疑似ピークの出現が低減されている。

【0125】図12(e)は、実際に得られた振幅透過率T(ω)(図12(a)の場合と同じ)に対して、有効な測光周波数域(本例では、0~1 THz)の平均値を差し引き、更に前記有効な測光周波数域に所定の定数値として0を補う処理(図10中のステップS31に相当)を行って得た振幅透過率を示す。図12(f)は、図12(e)に示す振幅透過率をフーリエ変換して得た時間領域波形S(t)を示す。図12(f)に示す時間領域波形S(t)では、図12(d)に示す時間領域波形S(t)と同様に、図12(b)に示す時間領域波形S(t)に比べて、疑似ピークの出現が低減されている。

【0126】[第6の実施の形態]

【0127】図11は、第6の実施の形態による厚み測定装置の制御・演算処理部23の動作を示す概略フローチャートである。

【0128】本実施の形態による厚み測定装置が前記第1及び前記第3の実施の形態と異なる所は、制御・演算処理部23の動作のみであり、重複する説明は省略する。

【0129】まず、本実施の形態で採用されている、計測時系列波形E_{ref}(t)に基づいて被測定物20の厚みdを求める手法について、説明する。

【0130】前記第3の実施の形態に関する説明において、基準時系列波形E_{ref}(t)及び計測時系列波形E_{...}(t)から、前記数4及び数5に従って、被測定物20の複素振幅透過率t(ω)(すなわち、振幅透過率T(ω)及び位相差φ(ω))を求めることができることを説明した。換言すれば、これらのデータは実測デー

タから得られるものである。なお、ここでいう基準時系列波形E_{ref}(t)は、発生器7と検出器11との間の光路上に被測定物20も試料も配置しない状態で計測されたものである。

【0131】これらのデータから被測定物20の物理量を算出するためには最適な物理的モデルを当てはめなければならない。被測定物20として、複素屈折率N=n+ik、厚みdの単層平行平板を、図1に示すように発生器7と検出器11との間の光路上に挿入した場合の理論的な複素振幅透過率t(ω)は、単層平行平板内部での光の多重反射を考慮すると、次の数8で示ようになる。

【0132】

【数8】

$$t(\omega) = \frac{E_{\text{sam}}}{E_{\text{ref}}} = \frac{4N}{(N+1)^2} \times \frac{e^{i \frac{(N-1)\omega d}{c}}}{1 - \frac{(N-1)^2}{(N+1)^2} e^{i 2 \frac{N\omega d}{c}}}$$

【0133】テラヘルツ周波数領域において光の吸収が無視できるものとするれば、複素屈折率N=n+ikにおいてk=0とおけるので、前記数8は次の数9のように書ける。

【0134】

【数9】

$$t(\omega) = \frac{E_{\text{sam}}}{E_{\text{ref}}} = \frac{4n}{(n+1)^2} \times \frac{e^{i \frac{(n-1)\omega d}{c}}}{1 - \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} e^{i 2 \frac{n\omega d}{c}}}$$

【0135】数9と数5との間の位相に関する比較から、数10が得られる。

【0136】

【数10】

$$\phi(\omega) = \frac{(n-1)\omega d}{c}$$

【0137】数10の左辺の位相差φ(ω)は、前述したように実測データから得られる量である。任意のある周波数ωについて被測定物20としての単層平行平板の屈折率nが既知であれば、実測データから求まる位相差φ(ω)から、数10より導いた次の数11を用いて、被測定物20としての単層平行平板の厚みdを算出できる。

【0138】

【数11】

$$d = \frac{c}{(n-1)\omega} \phi(\omega)$$

【0139】このように、「テラヘルツ時間領域」の計測技術を用いれば、これまでの光計測のように光の強度(すなわち電場の二乗)を計測せずに、光の電場強度の

時系列波形を直接計測できるので、複素振幅透過率 $t(\omega)$ の値（実測値から求めることができる値）に物理的なモデルを当てはめることにより、被測定物 20 としての単層平行平板の厚み d を算出できるのである。

【0140】以上から、本実施の形態では、計測時系列波形 $E_{\dots}(t)$ に基づいて、次のような手法で、被測定物 20 の厚み d を求める。

【0141】すなわち、本実施の形態では、前記第 2 の実施の形態と同様に、発生器 7 と検出器 11 との間の光路上に被測定物 20 を配置しない状態で、基準時系列波形 $E_{ref}(t)$ を予め計測しておく。

【0142】基準時系列波形 $E_{ref}(t)$ について、前記数 4 で定義されるようなフーリエ変換を実行して、参照用（基準用）の位相 $\theta_{ref}(\omega)$ を得る。この位相 $\theta_{ref}(\omega)$ は、前述した任意のある周波数 ω について求めれば足りる。また、計測時系列波形 $E_{\dots}(t)$ について、前記数 4 で定義されるようなフーリエ変換を実行して、位相 $\theta_{\dots}(\omega)$ を得る。この位相 $\theta_{\dots}(\omega)$ も、前述した任意のある周波数 ω について求めれば足りる。

【0143】さらに、被測定物 20 の複素振幅透過率 $t(\omega)$ の位相差 $\phi(\omega)$ を、前述した任意のある周波数 ω について求める。この位相差 $\phi(\omega)$ は、前記数 5 に従って、 $\theta_{\dots}(\omega) - \theta_{ref}(\omega)$ として求めればよい。そして、数 11 に従って、被測定物 20 の厚み d を求める。

【0144】次に、本実施の形態における制御・演算処理部 23 の動作の一例について、図 11 を参照して説明する。制御・演算処理部 23 は、動作を開始すると、基準時系列波形 $E_{ref}(t)$ を計測し（ステップ S41）、基準時系列波形 $E_{ref}(t)$ をフーリエ変換して位相 $\theta_{ref}(\omega)$ を求める（ステップ S42）。次いで、制御・演算処理部 23 は、計測時系列波形 $E_{\dots}(t)$ を計測し（ステップ S43）、計測時系列波形 $E_{\dots}(t)$ をフーリエ変換して位相 $\theta_{\dots}(\omega)$ を求め（ステップ S44）、位相差 $\phi(\omega)$ を算出する（ステップ S45）。その後、制御・演算処理部 23 は、数 11 に従って被測定物 20 の厚み d を算出し（ステップ S46）、算出した厚み d を表示部 24 に表示させ（ステップ 47）、動作を終了する。

【0145】なお、ステップ S41、S42 は被測定物 20 の厚み測定の度に行う必要はなく、適宜の頻度で行ってもよいし、例えば、製品出荷時などに最初に 1 回行うのみでもよい。

【0146】本実施の形態によっても、前記第 1 の実施の形態と同様の利点が得られる。

【0147】以上、本発明の各実施の形態について説明したが、本発明はこれらの実施の形態に限定されるものではない。

【0148】本発明による厚み測定方法及び装置で測定

した厚みが所定の基準を満たしているか否かを判定すれば、被測定物の厚み検査を行うことができる。したがって、本発明による厚み測定方法及び装置に、前記判定を行う判定段階又は判定部を追加すれば、被測定物の厚み検査方法及び装置を得ることができる。

【0149】

【実施例】本発明者は、前述した第 1、第 2、第 3 及び第 6 の各実施の形態でそれぞれ採用されている厚み測定手法に従って、既知の厚み $380\mu\text{m}$ を持つ半導体ウエハの厚みを実際に測定した。

【0150】その測定結果は、前述した第 1 の実施の形態で採用されている手法による場合には $384\mu\text{m}$ 、第 2 の実施の形態で採用されている手法による場合には $383\mu\text{m}$ 、第 3 の実施の形態で採用されている手法による場合には $389\mu\text{m}$ 、第 6 の実施の形態で採用されている手法による場合には $383\mu\text{m}$ であった。

【0151】これらの手法によって得られた半導体ウエハの厚みは $383\mu\text{m}$ から $389\mu\text{m}$ となり、約 2 パーセントの範囲で既知の厚みと一致しており、良好であった。また、非接触で半導体ウエハの厚みを計測することができたので、半導体ウエハの損傷や汚染等を防止することができた。

【0152】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、非接触で被測定物の厚みを測定することができ、被測定物の損傷や汚染等を防止することができ、しかも実用的となる。

【0153】また、本発明によれば、厚み測定に伴う損傷や汚染等がなく、高品質なウエハを提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】本発明の第 1 の実施の形態による厚み測定装置を模式的に示す概略構成図である。

【図 2】本発明の第 1 の実施の形態による厚み測定装置の制御・演算処理部の動作を示す概略フローチャートである。

【図 3】計測時系列波形の一例を示す波形図である。

【図 4】被測定物の測定部位付近の様子を模式的に示す図である。

【図 5】第 2 の実施の形態による厚み測定装置の制御・演算処理部の動作を示す概略フローチャートである。

【図 6】計測時系列波形及び基準時系列波形の一例を示す波形図である。

【図 7】第 3 の実施の形態による厚み測定装置の制御・演算処理部の動作を示す概略フローチャートである。

【図 8】振幅透過率及び時間領域波形を示す波形図である。

【図 9】第 4 の実施の形態による厚み測定装置の制御・演算処理部の動作を示す概略フローチャートである。

【図 10】第 5 の実施の形態による厚み測定装置の制御

・演算処理部の動作を示す概略フローチャートである。
 【図 11】 第 6 の実施の形態による厚み測定装置の制御
 ・演算処理部の動作を示す概略フローチャートである。
 【図 12】 各前処理を行って得た振幅透過率とこれらから得た時間領域波形を示す波形図である。
 【符号の説明】

1 フェムト秒パルス光源

*

* 7 テラヘルツ光発生器

9 可動鏡

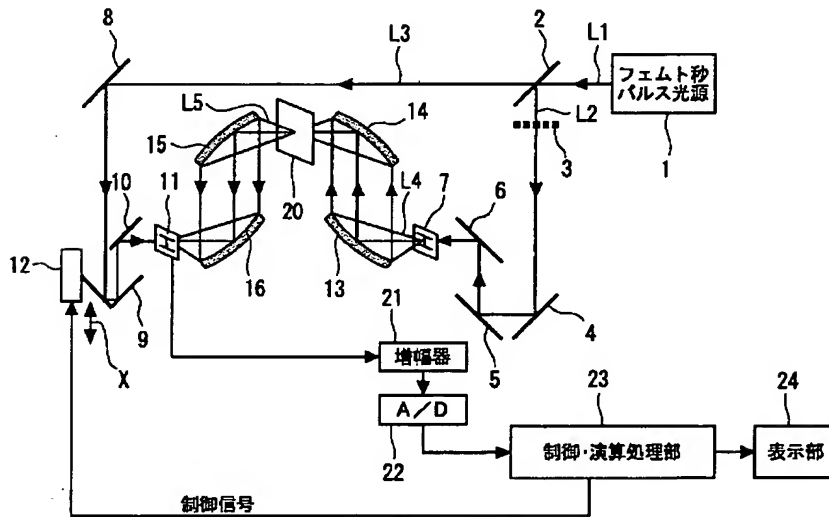
11 テラヘルツ光検出器

20 被測定物

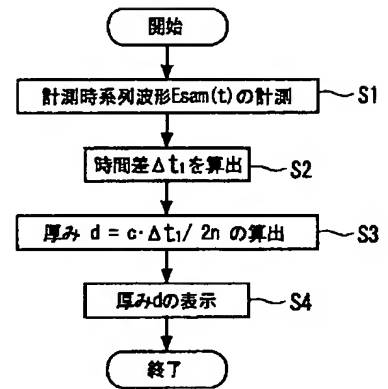
23 制御・演算処理部

24 表示部

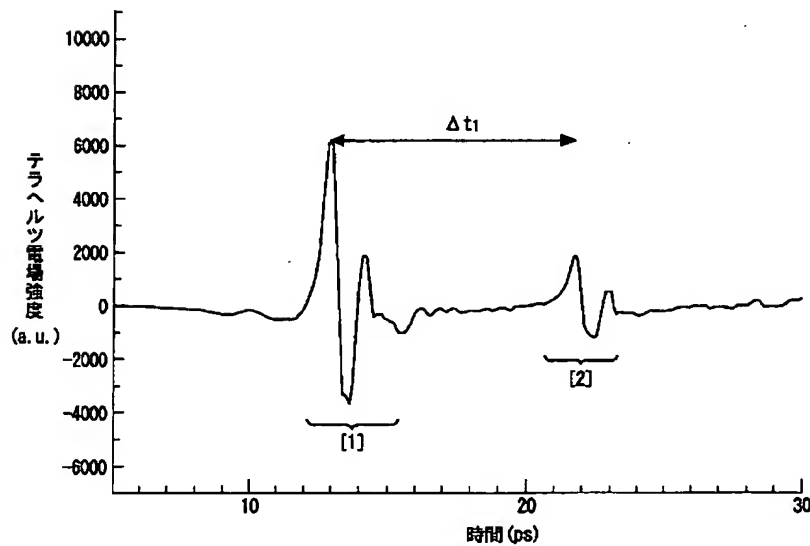
【図 1】



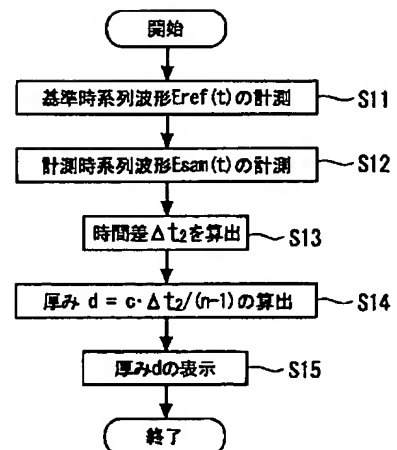
【図 2】



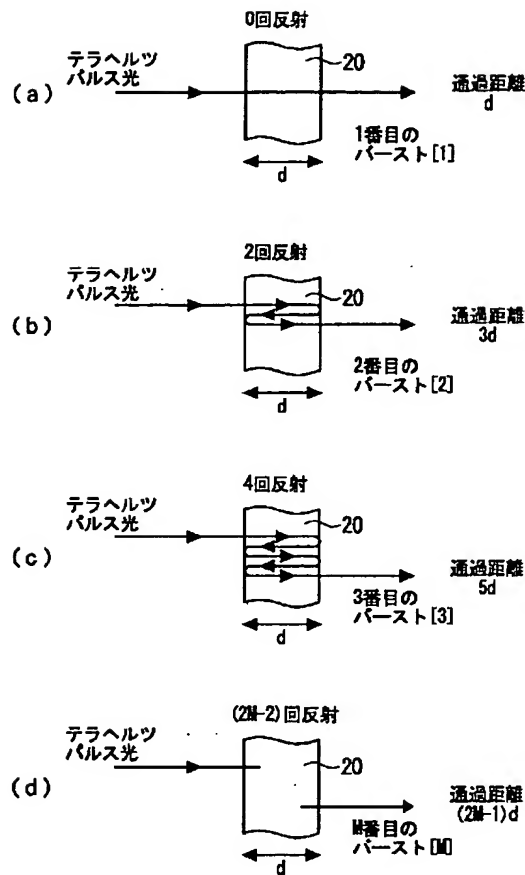
【図 3】



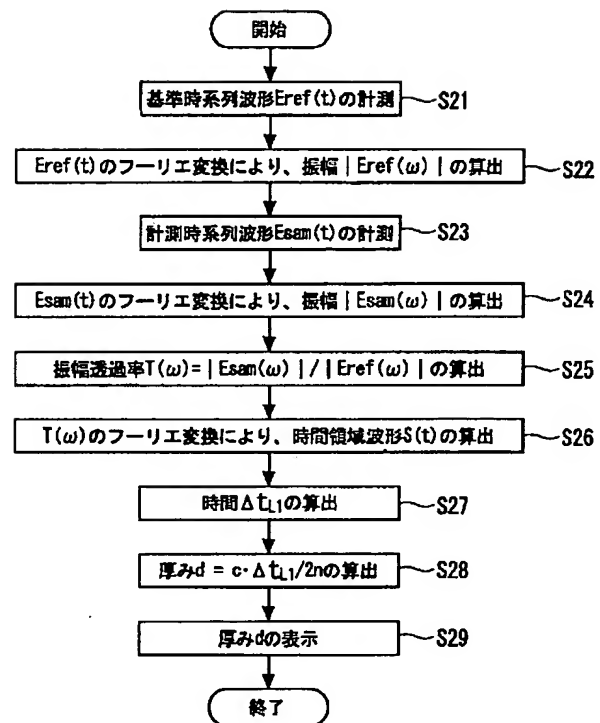
【図 5】



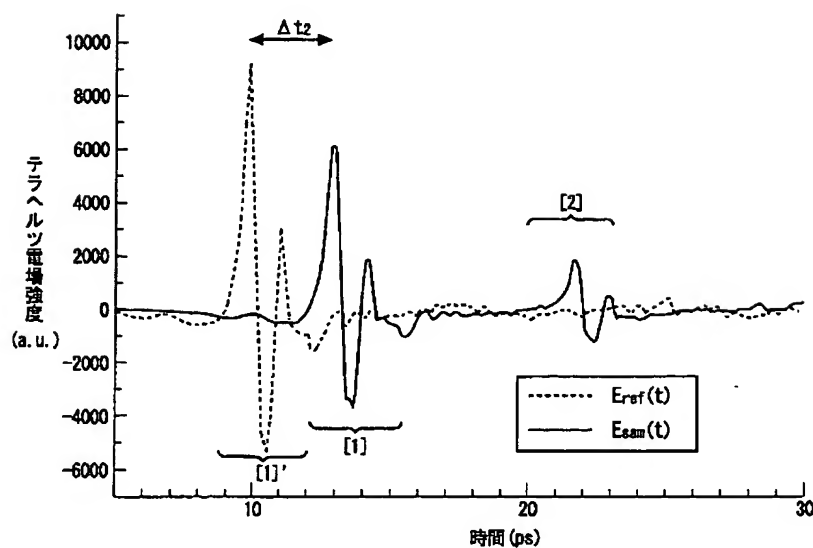
【図4】



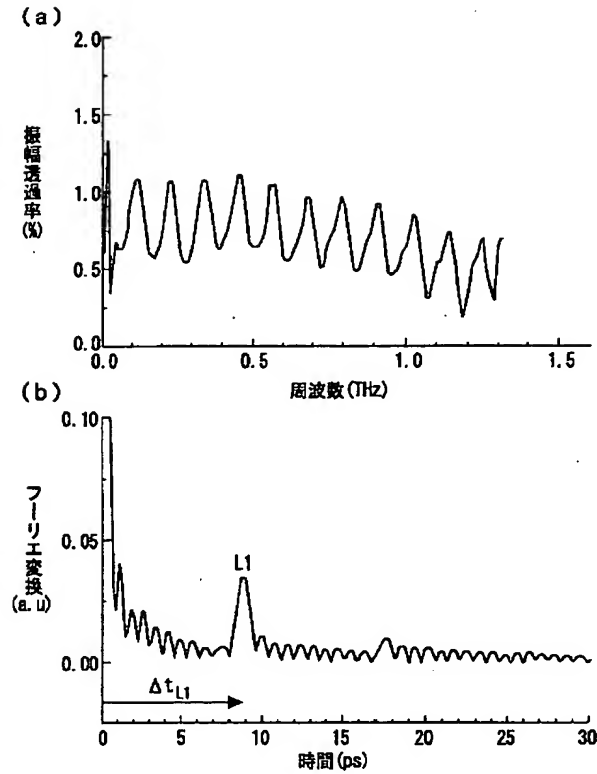
【図7】



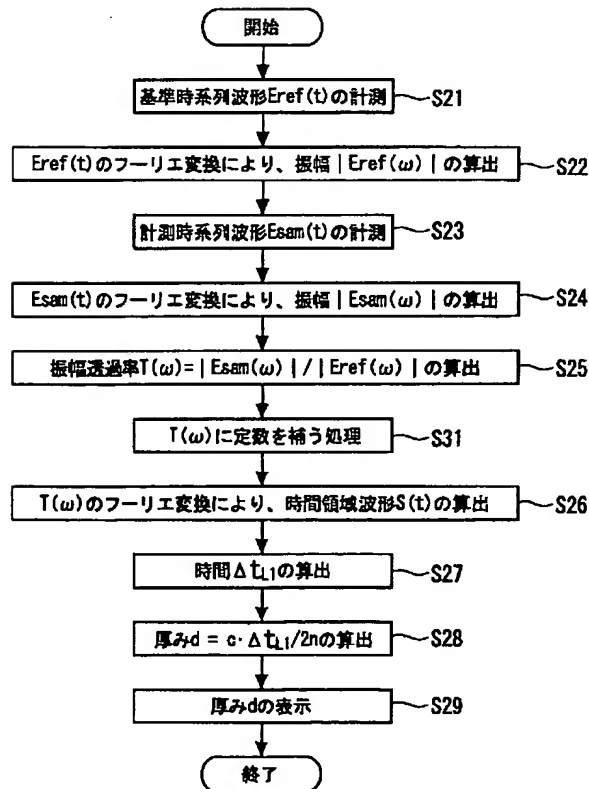
【図6】



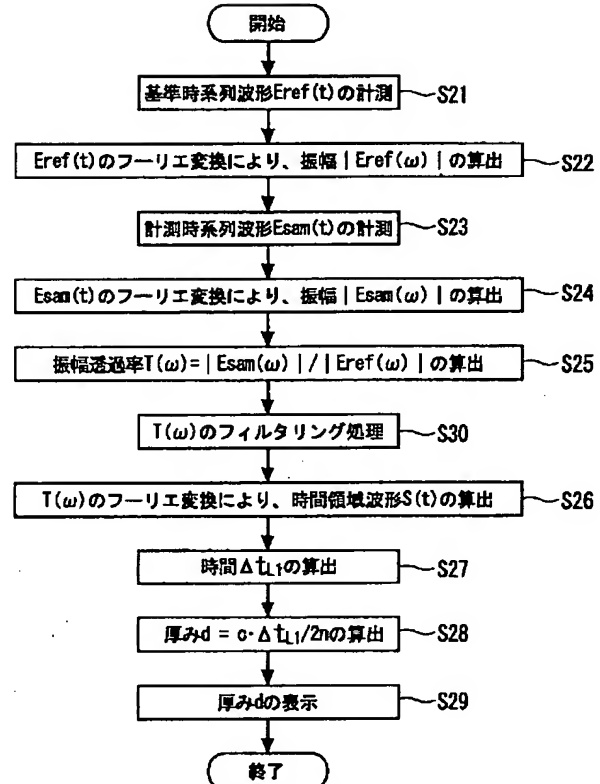
【図8】



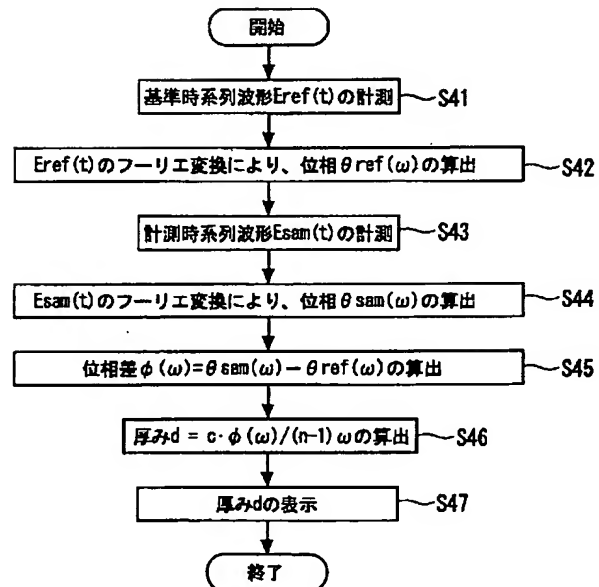
【図10】



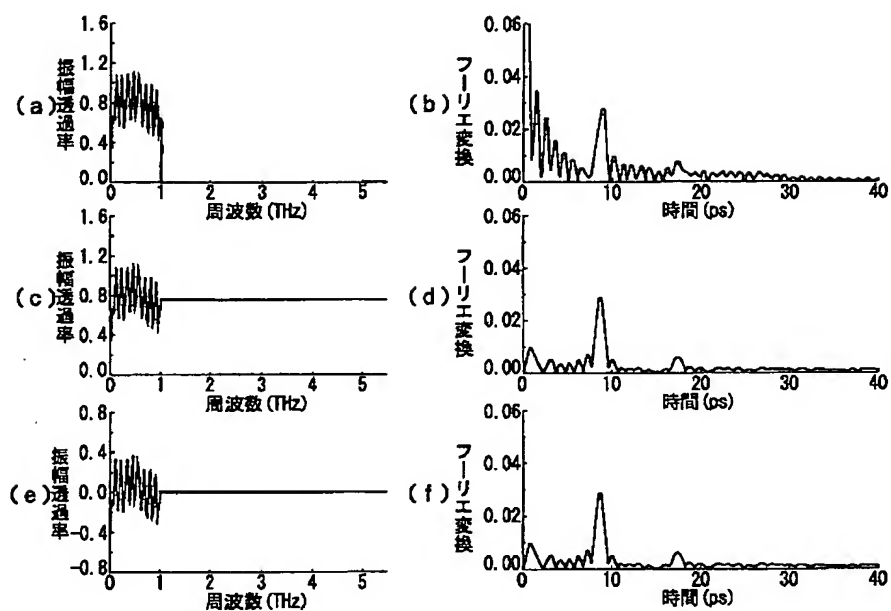
【図9】



【図11】



【図12】



フロントページの続き

F ターム(参考) 2F065 AA30 BB03 CC19 DD13 DD16
FF32 GG04 LL13 LL19 LL30
LL46 QQ04 QQ16 QQ33 UU01
UU05
4M106 AA01 BA05 CA48 DH12 DJ11